

均一及び不均一磁場中のPIG放電における振動と不安定性の研究

著者	黒田 勉
号	255
発行年	1969
URL	http://hdl.handle.net/10097/23501

氏名．（本籍）	黒 ^{くろ} 田 ^だ 勉 ^{つとむ}
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 第 2 5 5 号
学位授与年月日	昭和44年9月17日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最 終 学 歴	昭和35年3月 東北大学大学院理学研究科修士課程物理学専攻修了
学位論文題目	均一及び不均一磁場中の PIG 放電における振動と不安定性の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 木 村 一 治 教 授 石 松 敏 之 教 授 長 尾 重 夫

論 文 目 次

論 文 内 容 要 旨

近年 PIG 放電はしばしばプラズマ物理及び核融合の基礎的研究に於てプラズマ源として用いられて来た。しかし、これら一様磁場を管軸に平行にかけた PIG 放電によって発生したプラズマは非常に振動が多く不安定であることが多くの実験によって報告されてきた。又 PIG 放電の不安定性に関する理論的研究は PIG 放電でのプラズマの如く磁場に垂直な電場のあるプラズマは不安定になる事を示した。理論は実験をかなりよく説明している。プラズマ源として振動の多いプラズマを用いることは実験の再現性を悪くし、データの信頼度を低下させる。従って振動の少ないプラズマを発生させることはプラズマ物理及び核融合の基礎的研究に於て重要な一つである。

この論文では従来の PIG と同じ一様磁場のみではなく種々の型の磁場—磁気鏡型磁場、ダイバーター型磁場、カスプ型磁場—を PIG 放電に適用し、その時の振動の変化を周波数及び振幅について調べた。実験は振動の振幅に注目し、安定化の条件に関するもの（実験Ⅰ）とプラズマのパラメーター及び振動の性質を調べ、不安定性の機構を調べるもの（実験Ⅱ）の2つについて行なった。

実験Ⅰでは磁場の型と振動の関係、磁場の強度及び放電電流による振動の振幅の変化、陽極での電流分布について行なった。陽極は軸方向に分割されたものを用いた。内径は15cm、全長約50cmである。陰極はタングステンフィラメントをラセン型に巻いたもので、直径の異なるものを4つを用いた。種々の磁場は正磁場コイルの電流と逆磁場コイルの比を変えて発生させた。振動は陽極電圧の振動とプラズマの器壁電位の振動としてとり出し、周波数分析器で周波数を、オシロスコープで振幅を調べた。放電電流は主として5Aで実験し、15Aまで変えた。ガスは H_e 及び H_2 である。陽極電圧の振動はカスプ型及びダイバーター型磁場で小さくなり、陽極電圧の約1%以下になった。一様磁場では陽極電圧とはほぼ同じ程度に達する。陽極電流の分布は弱い磁場の所にある陽極にピークを示した。放電管内磁力線を計算した結果、振動が小さくなったダイバーター型磁場では陰極の周辺を通る磁力線が陽極の磁場零の近傍を通る磁場配位であることが解った。

陰極の直径を変えた時、磁場の型による振動の変化は定性的には変らなかったが、振動の振幅が小さくなる時の逆磁場コイルの電流 I_- と磁場コイルの電流 I_+ の比が異なることが解った。このことは PIG 放電の振動の小さくなる条件は磁場の型だけでなく放電管内の磁力線の配位によることを示している。

振動の振幅の磁場強度に対する依存性は一様磁場及び磁気鏡磁場の時振動の振幅が磁場強度の増大と共に増加する。ダイバーター型磁場での磁場強度及び放電電流に対する振動の振幅の変化は僅かに認められたが、いずれの場合にも放電のパラメーターの少しの補正によって最良の状態にすることができた。これは磁場零の点が磁場コイルの電流及び放電のパラメーターに非常に影響され易い事を示している。プラズマの密度の磁場の型による依存性をラングミュアプローブで測定した結果、振動の小さいダイバーター型磁場で密度が最大になり、プラズマ源として最良の放電状態であることが解った。

実験Ⅱでは一様磁場及びダイバーター型磁場中の PIG 放電で発生したプラズマの密度、電子温度、プラズマの電位の空間分布及び振動の周波数、異った場所での振動の相関関係、振動と放電の条件及び振動とプラズマの電位との関係を調べ、振動の性質、不安定性の機構を考察した。PIG 放電管の陽極は陽極中にプローブの挿入できる観測窓のある直径26cm、長さ50cmのものである。陰極は熱電子衝撃加熱による熱陰極である。放電々流は電子回路によって陰極温度を制御して一定に保った。又放電管内の気圧も電子回路によって一定になる様に制御した。放電は陽極をアース電位にし、陰極に負電圧をかけて気圧 3.7×10^{-3} Torr で行ない、放電々流は5Aまで磁場は一様磁場の時、約413 Gaussから960 Gauss、ダイバーター磁場の時、約50 Gaussから240 Gauss迄変えた。プラズマパラメーターの空間分布は放電管の半径の方向に可動なラングミュアプローブで測定した。振動はイオン及び電子のプローブ電流の振動として検出し、周波数を周波数分析器によって調べた。プラズマ柱の方位角方向の2つの異った場所での振動の相関関係は2つのフォトリランジスターでプラズマの光の振動を観測する事によって行なった。

一様磁場の場合電子温度及びその半径方向の分布は放電条件によらずほぼ一定であって約 1eV ~ 2eV で磁場 850 Gauss、放電々流 2 A、放電々圧 150 V の放電でプラズマ密度はプラズマの中心で $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ プラズマ電位はプラズマの中心で陽極に対して約 -20 V であった。プラズマ電位の径方向の分布はほぼパラボラであって、中心で最も低く、プラズマの表面では陽極電位にはほぼ等しかった。このプラズマ電位の半径方向の分布は磁場強度及び放電電流で殆んど変らないが、プラズマ柱の中心の電位と陽極電位の差は磁場強度及び放電々流の増大と共に増す。

一方ダイバーター型磁場に於てはプラズマ密度及び電子温度は一様磁場の場合と殆んど変らなかったが、プラズマ柱の径方向の電位の分布は明らかに差異が認められる。即ちダイバーター型磁場ではプラズマ中心の電位とプラズマ表面との電位差はたかだか 2 V 程度であって、磁場強度及び放電々流の増加によって殆んど変らなかった。

一様磁場中での振動は磁場の強度及び放電々流の増加に伴って周波数が高くなる。又高調波が観測され、より強い磁場で高調波が顕著に現われる。磁場強度及び放電々流に対する振動の周波数の変化はそれぞれの約 0.5 乗に比例している。又 (放電々流 I_d) \times (磁場強度 B) の函数として振動の周波数をまとめた結果、実験的には周波数 f は

$$f \propto (I_d B)^{1/2}$$

の関係がある事が解った。

ダイバーター型磁場での振動は一様磁場の場合と異り、プラズマ柱の中では非常に小さい。周波数の放電々流及び磁場強度に対する依存性は殆んどなかった。

一様磁場の場合についてプラズマの光の振動の位相関係は2つのフォトリランジスターが方位角方向に互に 90° の角度に設置された時 $\pi/2$ の位相差を示した。その位相関係は磁場の方向を反転した時全く逆転し、プラズマが軸を中心にして磁場に垂直な電場によるドリフトの方向に回転している事を示している。

以上の実験から PIG 放電の安定性及びその機構について考察した。実験(1)で陽極電流の分布が磁場の弱い所にピークをもつ事は放電々流は磁場を横切る拡散によることを示している。放電々流が拡散のみによるとすると一様磁場では放電々流を説明できない。比較的弱い磁場では磁場に垂直な電場による電子の移動によって説明できるが強い磁場ではこれによっても説明できず、陽極電流を説明するには異常拡散が起きていると考えねばならない。この場合拡散係数として Bohm の拡散係数を用いると放電々流を説明することができる。PIG 放電の不安定性に関する Hoh の理論によるとある臨界磁場以上の磁場強度の時、又は磁場に垂直な電場が臨界電場より大きい時、プラズマは不安定になる。その時の振動の周波数は摂動の基本モードに関して E を磁場に垂直な電場、 B を磁場強度、 R をプラズマの半径として

$$f = \frac{1.6}{2\pi R} \frac{E}{B}$$

で与えられる。この理論式を用い、磁場に垂直な電場及び磁場の実験値を代入すると計算値は周波数の測定値と factor 1.6 以内で一致する。

周波数の放電々流及び磁場強度に対する依存性の実験結果は理論式にプラズマの密度が放電々流の函数になる結果を考えに入れた式

$$f \propto I_a^{1/2} B$$

により、電流の依存性に対しては定性的な説明を与える事ができる。周波数の磁場強度に対する依存性の実験結果は理論と一致しない。これは理論では拡散を古典的なものであるとしている事及び PIG 放電のモデルがこの実験と異なるためと考えられる。不安定性の起る臨界磁場及び磁場電場の理論値をここでの実験条件について計算すると、放電々流 2 A の時について $B_c = 40$ ガウス、 $E_r = 0.3$ V/cm となる。ダイバーター型磁場では B_c 以上の磁場でもなお電場は臨界値より小さい。従ってダイバーター型磁場では磁場が臨界値よりも大きい時でもなお、磁場に垂直な電場が臨界値より小さいので不安定性が起らず、振動が小さいと考えられる。ダイバーター型磁場で何故磁場に垂直な電場が小さいかという事は陽極表面で磁場が零である事に大きな原因の一つであると考えられるが、この点については更に詳細な研究が必要である。

以上の実験及び考察から次の結論に達した。①一様磁場中での PIG 放電では Hoh 等によって報告されている不安定性が起きていて、振動の性質は周波数の磁場依存性を除いて理論によって比較的良好に説明できる。この様な放電では異常拡散が起きていると思われる。② PIG 放電での振動は陰極周辺の近傍を通る磁力線が陽極表面の磁場零の近くを通るダイバーター型磁場で小さくなる。③ダイバーター型磁場で振動が小さくなり、比較的 PIG 放電が安定になる原因は磁場に垂直な電場が非常に小さいことである。

論文審査結果の要旨

P I G 放電はプラズマ物理及び核融合の研究においてプラズマ源として用いられ、重要である。しかし一様磁場を管軸に平行にかけた場合はプラズマが不安定で振動の多いことが知られている。この論文では一様磁場だけでなく種々の型の磁場、特にダイバーター型磁場等をかけ、その時の振動の変化を周波数及び振幅について調べた。実験はほぼ2部に分かれ、Iでは磁場の型と振動の関係、磁場の強度及び放電々流による振動の振幅の変化、陽極での電流分布について行なった。放電管の長さは約50cm、ガスはHe及びH₂である。

陽極電圧の振動はカスプ型及びダイバーター型磁場で小さくなり、陽極電圧の約1%以下になった。一様磁場ではほぼ100%程度である。放電管内磁力線を計算した結果、振動が小さくなるダイバーター型磁場では陰極の周辺を通る磁力線が陽極の磁場零の近傍を通る磁場配位であることがわかった。

実験IIでは一様磁場及びダイバーター型磁場中のP I G放電で発生したプラズマの密度電子温度、プラズマの電位の空間分布及び振動の周波数、異った場所での振動の相関関係、振動と放電の条件及び振動とプラズマの電位との関係を調べ、振動の性質、不安定性の機構を考察した。一様磁場中での振動は磁場の強度及び放電々流の増加に伴って周波数が高くなる。また高調波が観測される。ダイバーター型磁場での振動はプラズマ柱の中では非常に小さく、周波数の放電々流及び磁場強度に対する依存性はほとんどない。

その他詳細なる実験及び理論的考察の結果著者はほぼ次の如き結論に到達した。

- (1) 一様磁場中でのP I G放電々流ではHoh等によって報告されている不安定性がおきている。

この様な放電では異常拡散が起きていると思われる。

- (2) P I G放電での振動は陰極周辺の近傍を通る磁力線が陽極表面の磁場零の近くを通るダイバーター型磁場で小さくなる

- (3) ダイバーター型磁場で振動が小さくなり、P I G放電が安定になる原因は、磁場に垂直な電場が非常に小さいためである。

以上著者は長期にわたる詳細な研究により、P I G放電の不安定性、特にダイバーター型磁場中の安定化に関し、従来知られて居なかった知見を発見し、この方面に貢献した。

よって、黒田勉提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。